

Structure robotic for vertical oil pipeline design methodology

María A. Urdaneta¹, Cecilia García², Roque Saltaren², Gustavo Contreras³, Gonzalo Ejarque²

¹*Departamento de Control y Electrónica, Ingeniería Eléctrica, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. urdanetatoo@gmail.com*

²*Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España* ³*Ingeniero de Proyectos, Técnicas reunidas. Madrid, España. Gacu88@gmail.com*

Abstract

This paper proposes the application of the methodology for deployment of the quality function to define the design criteria of a sliding robot to work in inspection and maintenance in oil wells. This study analyzes the system initially and the options for placement of a robotic structure evaluating alternatives and considering a robotic structure for this purpose. For that purpose a survey by consulting various experts on the topic with the aim of defining the characteristics that have the robot in accordance with the critical requirements in the application. In this paper we show the results obtained by the matrix QFD (Quality Function Deployment) when the input data are provided by the panel respondents. From these results it is possible to determine the technical requirements to be met by the robotic structure that you want to design.

Keywords: quality function deployment, structure, robotics, electric pumps, submersible progressing cavity pumps.

Metodología para definir los criterios de diseño de una estructura robótica en tuberías petroleras de operación vertical

Resumen

Este trabajo propone la aplicación de la metodología de despliegue de la función de calidad para definir los criterios de diseño de un robot deslizante para trabajar en tareas de inspección y mantenimiento en pozos petroleros. Dicho estudio analiza inicialmente el sistema y las diferentes opciones para la colocación de una estructura robótica evaluando alternativas y estudiando una estructura robótica para tal fin. Para ello se realizó una consulta por medio de encuesta a varios expertos en el tema con la finalidad de definir las características que debe tener el robot de acuerdo con los requerimientos críticos que tiene la aplicación. En este trabajo se muestran los resultados arrojados por la matriz QFD (Quality Function Deployment) cuando los datos de entrada son los proporcionados por el grupo de expertos encuestados. A partir de estos resultados es posible determinar los requisitos técnicos que debe reunir la estructura robótica que se desea diseñar.

Palabras clave: despliegue función calidad, estructura robótica, bombas electro sumergibles, bombas de cavidad progresiva.

Introducción

En los últimos años se han reportado diferentes trabajos tendientes a incluir a robots en diferentes aplicaciones con tuberías [1-4], diseñados para trabajar en superficies verticales.

Los criterios que se definen para el desarrollo del primer prototipo, se basan en el análisis objetivo de los resultados de las encuestas realizadas a un grupo de expertos en el sector del petróleo. Este análisis ha permitido proponer criterios en cuanto a la estructura mecánica, el sistema de tracción, el sistema de comunicación, sensorización y electrónica interna, entre otros.

El análisis realizado se basa en el despliegue de una función de calidad denominada QFD (*Quality Function Deployment*) [5]. A través de este método es posible lograr definir un producto, en este caso un robot para tareas de inspección y mantenimiento en tuberías petroleras.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera; en la primera parte, se realiza una breve descripción de la aplicación de la matriz QFD, luego, se incluye una breve descripción del entorno de trabajo del robot en los sistemas de bombas y posteriormente se indica con qué tipo de sensores se pueden medir los problemas de las bombas antes que se produzca la falla de las mismas.

También se describe en esta sección cual sería el alcance del proyecto. Se presenta el instrumento aplicado y sus representaciones gráficas, se describe la metodología a utilizar para definir los criterios de diseño utilizando la función QFD (*Quality Function Deployment*), se traduce como **despliegue de la función de la calidad**, se describe como se construyó la QFD, para nuestro caso, y los resultados que es definir los criterios de diseño. Finalmente se plantean las conclusiones.

Aplicación de la matriz QFD

QFD se fundamenta en la búsqueda de las necesidades del usuario, teniendo en cuenta tanto las expresadas como las no expresadas, las cuales son trasladadas dentro de las acciones de diseño. Constituye una herramienta de apoyo importante para la toma de decisiones en la etapa temprana del diseño.

QFD se divide en 4 fases que se describen a continuación. Cada una de estas fases utiliza una matriz para trasladar los requerimientos del cliente hacia los diferentes módulos de obtención del producto. (Ruiz y Lopez, [6]).

- Fase 1: Planificación del producto (house of quality)
- Fase 2: Diseño del producto.
- Fase 3: Desarrollo del producto.
- Fase 4: En esta fase se realiza la evaluación del desempeño del producto.

Al final del proceso de desarrollo, se obtendrá un producto totalmente adaptado a las necesidades del usuario [7].

Los expertos consultados se encuentran repartidos a lo largo de la geografía mundial por lo que el procedimiento de encuesta se realizó por medios electrónicos (e-mail y video conferencia) para que la opinión de uno no afectara al resto. A partir de dichas encuestas se pretenden obtener conclusiones sobre los siguientes aspectos técnicos del prototipo: morfología del robot, sensorización requerida, funcionalidad del mismo.

Descripción del entorno de trabajo del robot

Bomba de Cavidad Progresiva (BCP)

Las bombas de cavidad progresivas están compuestas por un eje de forma helicoidal que gira dentro de un estator de goma con cavidades que trasladan el crudo a medida que el eje gira a través de ellas. (Figura 1a). La bomba de cavidad progresiva es impulsada desde la superficie a través de una serie de cabillas roscadas que permiten transmitir el movimiento desde el fondo a la superficie. Puede ser instalada hasta profundidades de 8000 pies, manejando flujos cercanos a los 4000 barriles por día, dependiendo de su configuración, diámetro y velocidad de giro. Los principales problemas de una bomba de Cavidad Progresiva, el efecto causado y las variables a medir con el robot propuesto se presentan en la Tabla 1.

Problemas de un equipo BES

Para operar un equipo BES (Figura 1b) maximizando la producción y la expectativa de vida

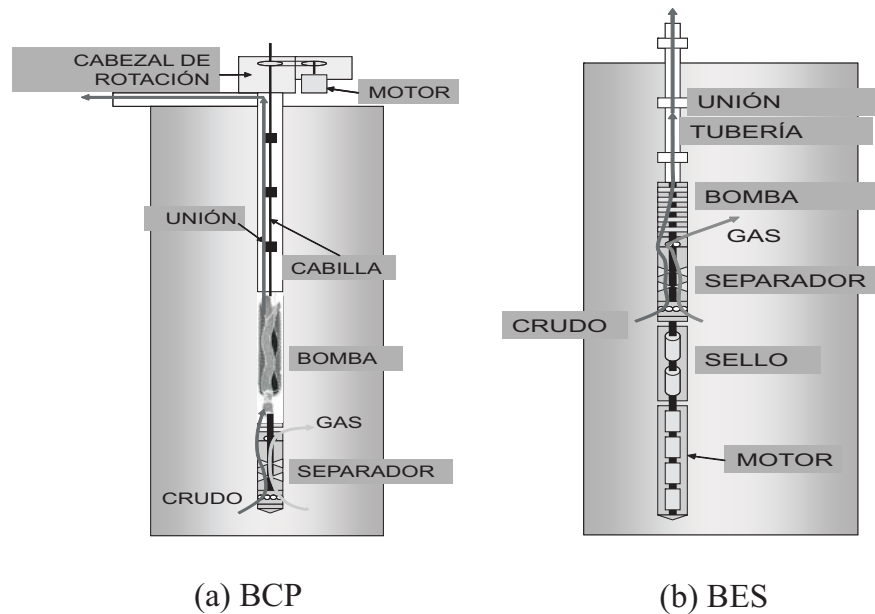


Figura 1. 1a) Sistema de bombas BCP, 1b) Sistema de bombas BES.

Tabla 1

Variables a tener presente para las Bombas de Cavitación Progressiva y el efecto causado

Problemas operacionales	Efecto causado	Variable a medir
Nivel de crudo	Achique del pozo, trabajo de la bomba en vacío (alta temperatura, alto par)	Temperatura, nivel de fluido
Entorchamiento de cabillas	Posible desconexión de cabillas, desgastes al pegar con la tubería.	Vibración
Bajo flujo	Daño de la bomba por alta temperatura (se calienta el elastómero)	Temperatura
Atascamiento	Rotura de barras roscadas por sobre-torque oscilaciones (<i>stick-slip</i>).	Vibración
Mal espaciamento	Daño de la bomba al chocar el rotor con el nipple de paro. O pérdida de eficiencia al dejar muchas etapas del rotor fuera del estator	Profundidad
Sobre velocidad	Deslizamiento de la bomba, baja producción (alta temperatura, alto par).	Temperatura, Vibración
Daño en la tubería	Recirculación entre la tubería y el pozo, pérdida de la producción, daño de la bomba por alta temperatura.	Fisuras en la tubería
Tipo de crudo y minerales	Ataque del elastómero por ácidos, aceites o desgaste por abrasión con la arena o sólidos.	Toma de muestra
Baja velocidad	El crudo no llega a superficie (escurrimiento). Pérdida de producción, daño de la bomba por alta temperatura.	Condiciones de la tubería

de los equipos, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos según la Tabla 2.

Un robot diseñado debe poder ejecutar las siguientes funciones: Medición exacta de la temperatura y presión en función de la profundidad, determinación de la geometría de la tubería de producción en función de la profundidad, determinación exacta del nivel de crudo y la ubicación de los equipos, vibración de la tubería y cabilla, ubicación exacta de roturas en la tubería y determinación de la geometría de la misma, extracción de herramientas con ayuda de sensores, toma de muestras de crudo a diferentes profundidades [8].

Parte experimental: instrumento utilizado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a través del método QFD de las encuestas realizada a expertos del sector del petró-

leo, aspectos técnicos del entorno en las encuestas realizadas, el 100% de los expertos consultados coinciden en que es de extrema importancia la medición de variables en el pozo como se presentan en la Figura 2.

En la Figura 3 se refiere a las dimensiones del pozo que permitirá determinar el espacio disponible por el cual puede pasar el robot entre la tubería de producción y el pozo. En la Figura 3a se ven las dimensiones de algunos pozos tipo y en la Figura 3b se ven las dimensiones de las tuberías de producción.

Claramente se puede observar en la Figura 3a, el pozo más utilizado es el de casing 9 5/8" con tubería como se muestra en la Figura 3b de 5 1/2" (139cm) de diámetro, consecuentemente se seleccionará este para los ensayos con el robot en el laboratorio. A la pregunta de dónde debería estar situado el sistema de medición, la respuesta con mayor número de expertos a favor se puede observar en la Figura 4a. Como consecuencia

Tabla 2
Variables a tener presente para las bombas electro sumergibles y el efecto causado

Problemas operacionales	Efecto causado	Variable a medir
Nivel de crudo	Achique del pozo, trabajo de la bomba en vacío. (daño por alta temperatura)	Temperatura, nivel
Daño en el cable de alimentación	Paro del motor, pérdida de producción	(Medición de continuidad del conductor)
Bajo flujo	Daño de la bomba por alta temperatura	Temperatura, presión
Atascamiento	Daño del motor por sobre torque, sobre temperatura	Temperatura
Arranques sucesivos	Daño del motor por sobre temperatura	Temperatura
Sobre velocidad	Deslizamiento de la bomba, cero producción, daño de la bomba por alta temperatura (efecto licuadora)	Temperatura, vibración
Daño en la tubería	Recirculación entre la tubería y el pozo, pérdida de la producción, daño de la bomba por alta temperatura.	Fisuras en la tubería
Tipo de crudo y minerales	Desgaste por abrasión con la arena o sólidos.	Muestra de crudo
Baja velocidad	El crudo no llega a superficie (escurrimiento). Pérdida de producción, daño de la bomba por alta temperatura.	Temperatura

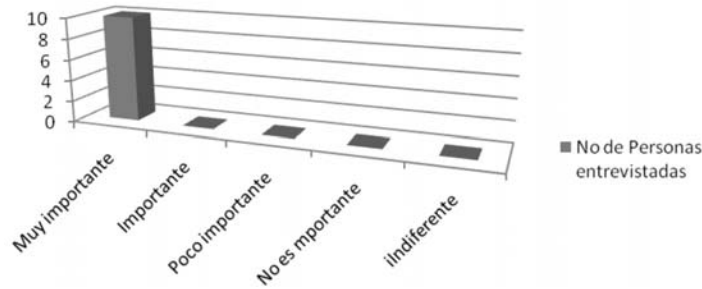


Figura 2. Importancia de la medición de variables en pozo con sistemas de BES y BCP.

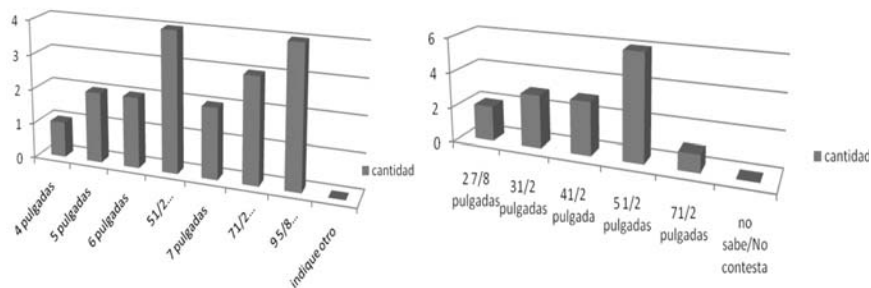


Figura 3. a) Dimensiones del pozo. 3b) Dimensiones de la tubería de producción.

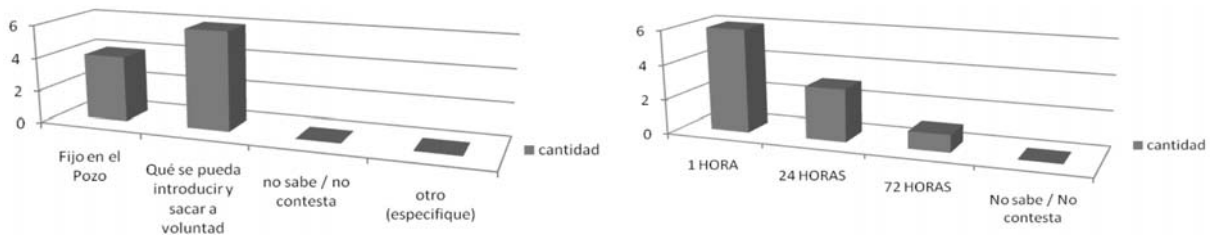


Figura 4. a) Movilidad del robot. 4b) Tiempo en subir y bajar el robot.

se debería diseñar un sistema móvil, esto es que se pueda introducir y sacar del pozo con facilidad. En la Figura 4b se presentan el tiempo empleado para subir y bajar el robot observándose un máximo de 72 horas.

Es de especial interés conocer las posibles temperaturas máximas que se pueden registrar dentro del pozo, puesto que habrá que prever el aislamiento térmico de todos los componentes hardware del robot. Los expertos expresaron que la temperatura máxima que puede esperarse es de aproximadamente 400 °C según la Figura 5a temperatura con la bomba apagada, 5b temperatura con la bomba encendida.

En la Figura 6a se muestra la Medición de Variables en Pozo de acuerdo al orden de impor-

tancia. En cuanto a las variables propias de la aplicación que deberían ser medidas, los expertos han expresado que de mayor a menor importancia estas deberían ser: temperatura, nivel de crudo, viscosidad y presión para las bombas. En la Figura 6b se observa que el momento en el cual se debe introducir el robot es durante el funcionamiento de la bomba.

También se preguntó sobre el momento en el cual sería bueno introducir el sensor, los resultados se muestran en la Figura 7a, se indica que la comunicación sea en tiempo real. En la Figura 7b, se indica que el sensor debe ser fijo en pozo.

Con el fin de valorar funcionalidades adicionales del sistema robótico, se consultó sobre eventos, fortuitos o no, que puedan provocar da-

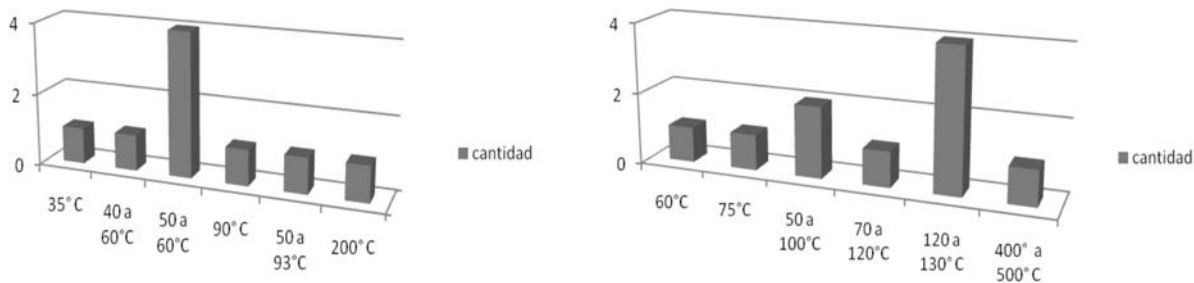


Figura 5. Temperatura en el pozo con la bomba: 5a Apagada, 5b Encendida.

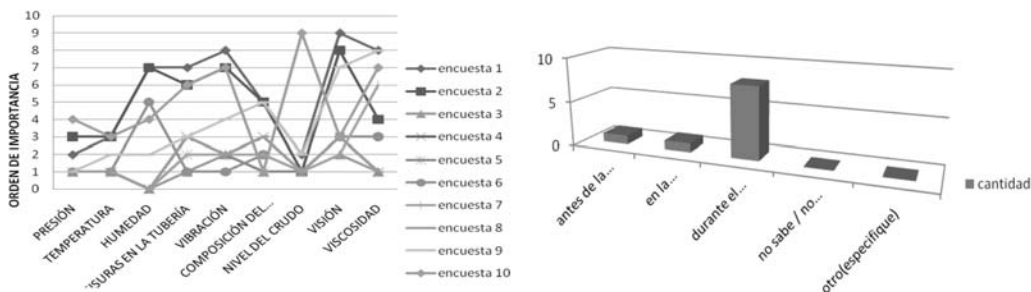


Figura 6. a) Ponderación de las variables en el pozo, b) momento en el cual se debe introducir el robot.

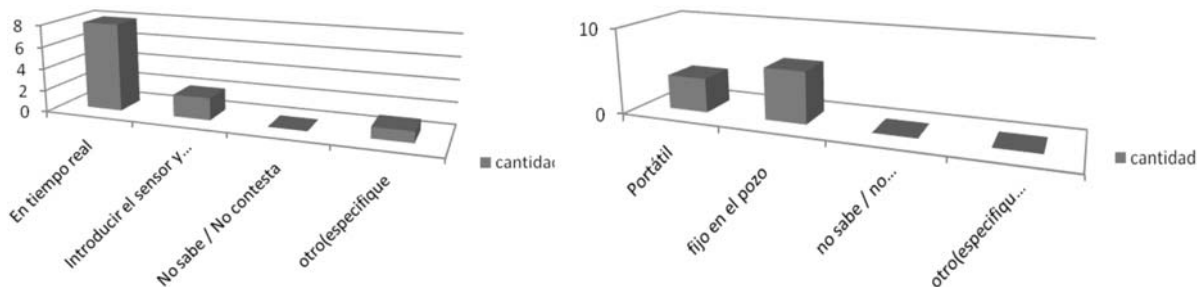


Figura 7. a) Como debe ser la comunicación con el sensor, b) Portabilidad del sensor.

ños en las bombas electrosumergibles BES y bombas BCP. Los resultados se muestran en la Figura 8a BES y 8b BCP. Claramente los arranques sucesivos del motor, el bajo flujo, sobrevelocidad son las principales causas.

Adicionalmente se propusieron otras causas de daño para los equipos BES: fallas por el uso, flujo de corriente y voltaje en el sistema, fallas desconocidas.

Adicionalmente se realizó en otra parte de la encuesta algunas preguntas sobre las características importantes que debe tener el sensor propuesto: resultando que debe ser fijo en pozo, de acuerdo al peso, debe ser liviano, pequeño, de fácil manejo, se recomienda su fabricación en acero.

Metodología utilizada para definir los criterios de diseño

Se utilizará una metodología usada actualmente para el diseño de productos, que permite realizar la traducción del mundo del cliente al mundo de la ejecución de un producto. En este sentido, el **QFD** (*Quality Function Deployment*) se traduce como **despliegue de la función de la calidad**. En la Figura 9 se muestran las modificaciones propuestas y se observan las sub-matrices:

- Requisitos del cliente (cómos): Lista estructurada de los requisitos que de lo que se va a diseñar.

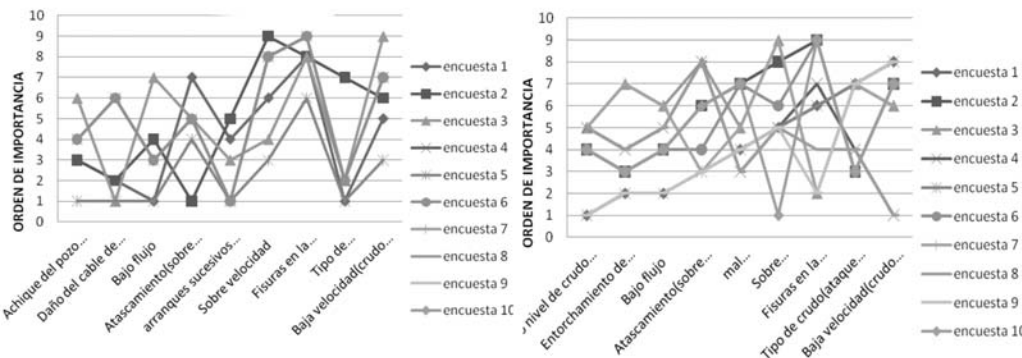


Figura 8. Ponderación de las causa más frecuente de daño de las: a) BES y b) BCP.

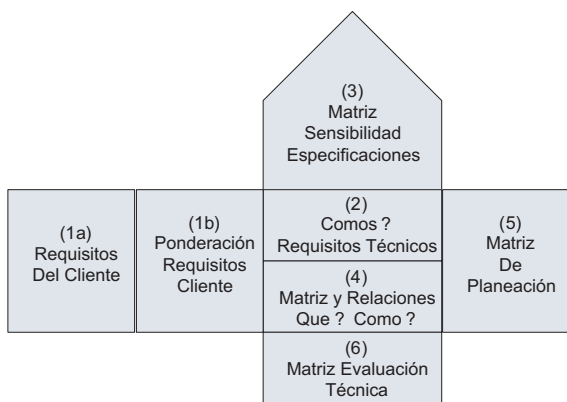


Figura 9. Matriz de planificación de QFD modificada.

- Requisitos Técnicos (Que’s): Un grupo estructurado de características relevantes del producto.
- Sub-matriz de Planeamiento: Ilustra las opiniones del cliente en las entrevistas realizadas.
- Sub-matriz Sensibilidad (techo): Donde los requisitos técnicos apoyan o impiden el producto.
- En la parte central (con el 4): Relaciones entre que’s (Clientes) y como’s (Ingeniero diseñador).
- En la parte inferior (con 6): Resultados de la matriz a ser analizados para el diseño del producto.

Para la construcción de la matriz QFD se utilizó una hoja de cálculo de libre distribución. Se seleccionaron algunos parámetros obtenidos de las encuestas.

En la parte central en el cruce entre los requisitos del cliente y los planteamientos con la leyenda: Θ : Relación Fuerte, 9, O: Relación Moderada, 3, \blacktriangle : Relación Débil, 1 (ver Apéndice).

En el techo de la casa se construye la matriz de inter relación de los factores técnicos: En esta se destaca como factores negativos en los cuales se debe reforzar a la hora del diseño.

Resultados

Finalmente se presentan los resultados arrojados por el programa de la matriz que se resumen a continuación en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se presentan como parámetro de mayor relación peso/importancia con 315 de peso para el cliente los sensores que deben colocarse a la estructura del robot ya que esa será la función principal del robot, luego está el receptáculo con 205 y el sistema de comunicación en tiempo real 195 y finalmente el sistema de tracción con 180. En la Figura 10 se presenta el robot diseñado en inventor.

Análisis de resultados

Con este análisis realizado podemos resumir las características técnicas del robot en la Tabla 4.

Conclusiones

Basados en el estudio realizado sobre las partes que debe contener la estructura a plantear son de gran complejidad y para definir los criterios de diseño se realizó una encuesta a expertos en el área y se aplicó una metodología basada en

Tabla 3
Tabla de resultados de requisitos técnicos

	Dificultad	Peso/importancia	Peso real
Tracción con ruedas	8	180	12,7
Receptáculo a prueba de explosión aislado (electrónica)	10	205,0	14,4
Estructura liviana	6	90	6,3
Dimensiones de la estructura que se acople entre la tubería y el pozo	9	20	1,4
Diseño de una interfaz amigable para el control	5	90	6,3
Comunicación con la superficie(tiempo real)	10	195	13,7
Alámbrico (por seguridad)	10	15	1,1
Sensores internos	7	75	5,3
Autónomo con control subir y bajar	9	65	4,6
Visión	4	15	1,1
Sensores externos: Temperatura, Presión, Nivel del crudo, Viscosidad	3	315	22,2
Sensor de Vibración	2	75	5,3
Composición del crudo(toma de muestras)	10	80	5,6

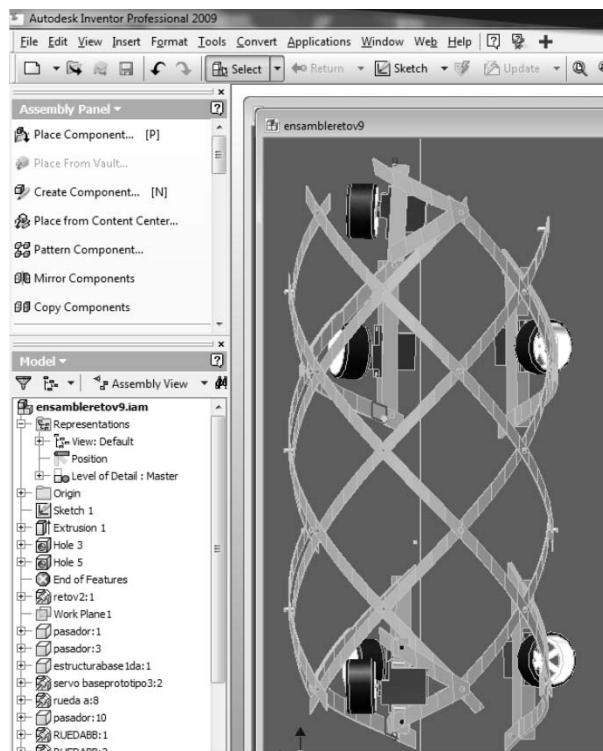


Figura 10. Prototipo diseñado en CAD.

Tabla 4
Tabla resumen de las características técnicas del robot

Sistema	Características	Consideraciones de diseño.
Sistema de tracción	Debe ser una estructura que se mueva rápidamente ya que se debe mover grandes distancias.	Estructura con ruedas, que se adapte a las paredes de la tubería de producción. Actuadores eléctricos motores DC sin escobillas. La definición del motor dependerá de las condiciones de torque, par, etc. engranajes y encoders.
Estructura mecánica	<ul style="list-style-type: none"> - Liviana - Pequeña. - Material resistente. - Que sea capaz de trasladarse entre el pozo y la tubería de producción. 	Robusta dimensiones y forma considerar. Clasificación de áreas clase 0 división cero, Estructura: liviana y se acople a la tubería con la estructura, que quepa entre la tubería de producción y el pozo (variable por el pozo). Ocupar las dos terceras partes de la tubería para salvar cuando la tubería se pandea en el pozo y deberá salvar las uniones de la tubería.
Sistema de Control	Fácil manejo.	Realizar diseño adecuado a estas situaciones, realizar el sistema de control para el cual se diseña.
Sistema de Sensores	<p>Internos: Encoders, acelerómetros, giroscopio, sonar, infrarrojo.</p> <p>Sensores externos: Intercambiables, presión, temperatura, nivel de sugerencia, humedad, toma de muestra, fisuras en la tubería, vibración, visión.</p>	Colocar sensores internos para el control del robot y Sensores externos para las variables que se desean medir; debido a la cantidad de variables a medir resultado de la encuesta realizada, se incorporaran los sensores que sean necesarios de acuerdo a las necesidades específicas del momento.
Sistema de Comunicación	Alámbrico (debido a que el robot requiere de un cordón umbilical por medidas de seguridad. En tiempo real	Diseño de un sistema de comunicación por cable del robot con la superficie que mida las variables en tiempo real (Robot semiautónomo)
Electrónica Interna	Tarjeta y micro controlador deberá adaptarse a los requerimientos del sistema	Debido a los costos, se utilizará una tarjeta para el prototipo inicial que deberá ser sustituida por una que cumpla con los requisitos del sistema. Y toda la electrónica asociada.
Alimentación	Por el cordón de seguridad.	La alimentación puede estar en la superficie.

la matriz QFD que permitió establecer los criterios de diseño basados en las necesidades de los clientes.

Se propone un diseño de una estructura que se fije a la tubería, rígida, pero, liviana, robusta, de acero que soporte las condiciones del pozo, con un receptáculo aislado para contener la electrónica, con ruedas para su desplazamiento rápido, que se comunique en tiempo real con una interfaz de usuario amigable y de fácil manejo, en la cual, debe estar la información de los sensores internos y los externos al robot. La comunicación debe ser con un cordón por cuestiones de seguridad del equipo, debe ser autónomo solo con instrucciones de bajar o subir por la tubería.

En dicho estudio se observó la complejidad del problema y que este debe desglosarse en varios trabajos:

- Diseño y ejecución de la autonomía de la estructura robótica a diseñar con una estructura de sensores internos. La interfaz de usuario para el control del robot y la medición de las variables de interés.
- Incorporación a la estructura de sensores externos que le permitan medir las variables necesarias en el proceso y su comunicación en tiempo real con un computador en la superficie que genere gráficos de tendencias que puedan ser utilizados como reporte de las variables medidas.
- Diseñar la posibilidad de hacer reconfigurable al robot para salvar obstáculos (bridas y posibles uniones con las paredes del pozo petrolero) (Figura 11).

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo económico a la Universidad del Zulia, al Ministerio de Ciencia e Innovación (DPI2009-08778), a la Comunidad de Madrid (RoboCity 2030 II) y a BCP-VEN por su colaboración por la información suministrada para la realización de esta investigación.



Figura 11. Robot en tuberías de operación vertical (RETOV).

Referencias bibliográficas

1. Weimin Shen, Jason Gu and Yanjun Shen.: "Proposed Wall Climbing Robot with Permanent Magnetic Tracks for Inspecting Oil Tanks". IEEE International Conference, (2005).
2. Fengyu Xu, Xinsong Wang y Qi Xie: "Obstacle Crossing Ability of a New Wheel-Based Cable Climbing Robot". 15 th International conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. (2008), pp. 545-549.
3. Fengyu Xu, Xinsong Wang: "Design and Experiments on a New Wheel-Based Cable Climbing Robot". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, (2008), pp. 418-422.
4. Ali Baghani, Majid Nili Ahmadabadi y Ahad Harati: "Kinematics Modeling of a Wheel-Based Pole Climbing Robot (UT-PCR)". IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2005), pp. 2099-2104.

- 5. Zairi, M. y Yousef, MA: "Despliegue de la función de calidad - Un pilar fundamental para el éxito total quality management and product development, Journal of Quality and Reliability gestión de la calidad total y desarrollo de productos", Diario de la calidad y Confiabilidad Management, 12(6), 9-23 Gestión, (1995), pp. 9-23.
- 6. José Ruiz, Canela López: "La gestión por Calidad Total en la empresa moderna", Editorial rama, 1era edición, (2003), pp. 502.
- 7. Erika Olaya, Carlos Cortés, Oscar Duarte: "Despliegue de la función de calidad (QFD):

beneficios y limitaciones detectados en su aplicación al diseño de prótesis mioeléctrica de mano", Red de revistas Científicas de América latina y el Caribe, España y Portugal. (2005), pp. 30-38.

- 8. María Urdaneta y Roque Saltaren: " Estudio del Sistema de tracción de una estructura robótica para tuberías en Sistemas de Extracción Petrolera con BES y BCP". XXIX Jornadas CEA. (2008).

Recibido el 7 de Abril de 2011
En forma revisada el 21 de Mayo de 2012

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Impertencia	Quality Characteristic (a.k.a. "Functional Requirements" or "How")	Column #																						
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15								
				Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "What")																							
				Quality Characteristic (a.k.a. "Functional Requirements" or "How")																							
1	9	20,0	20,0	RÁPIDO	Θ	▲	▲																				
2	9	20,0	20,0	MATERIAL RESISTENTE		Θ	▲																				
3	9	5,0	5,0	LIVIANO		▲	Θ	▲																			
4	3	5,0	5,0	PEQUEÑO			▲	○																			
5	9	10,0	10,0	FÁCIL MANEJO					Θ				▲	○													
6	9	15,0	15,0	HIDA VARIABLES EN TIEMPO REAL							Θ	▲	○	▲				Θ	▲	▲							
7	9	5,0	5,0	TOMA DE MUESTRAS											○						Θ						
8	9	20,0	20,0	COLOCAR SENSORES INTERCAMBIABLES												Θ	○	▲									
9																											
10																											
				Target or Limit Value																							
				Difficulty (0-Easy to Accomplish, 10-Extremely Difficult)	8	10	6	9	5	10	10	7	9	4	3	2	10										
				Max Relationship Value in Column	9	9	9	3	9	9	1	3	3	3	9	3	9										
				Weight / Impertencia	180,0	205,0	90,0	20,0	90,0	195,0	15,0	75,0	65,0	15,0	315,0	75,0	90,0										
				Relative Weight	12,7	14,4	6,3	1,4	6,3	13,7	1,1	5,3	4,6	1,1	22,2	5,3	5,6										

Apéndice A. Matriz QFD para definir criterios de diseño de un Robot para BES y BCP.